

縦衝撃により有限長棒内を伝ばする塑性波に関する研究

著者	伊達 秀文
号	1091
発行年	1989
URL	http://hdl.handle.net/10097/12040

氏 名	伊 達 秀 文
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年12月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和46年3月 東北学院大学工学部機械工学科卒業
学 位 論 文 題 目	縦衝撃により有限長棒内を伝ばする塑性波に 関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 谷 順二

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

一般に、高ひずみ速度加工と呼ばれている爆発成形や電磁成形及び切削加工などにより生ずるひずみ速度は $10^3 \text{ s}^{-1} \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$ 程度といわれている。また、飛翔体が静止物体などを貫通する際にも、高いひずみ速度場の発生をとめない、その場合、変形に要する時間はマイクロ秒オーダーである。

上述した変形のいずれにおいても、しばしば、断熱的な shear band が発生する。この shear band に沿って、微視的には、微小クラックやボイドが見られるため、製品としては不良でもあり、また最終的には破壊につながる恐れもあることから、この shear band の初生、伝ばを知ることは重要である。この shear band は、塑性変形によるひずみ硬化の速度よりも、塑性仕事が熱に変換されて起こる軟化の速度が大きくなったときに起こると考えられている。したがって、この shear band を解析するためには、発生のためのクライテリアを決定することのほかに、内部発熱による温度上昇を考慮した構成式を得ることが重要である。

このような高ひずみ速度の下で変形を受けた試験片には、弾性波および塑性波が発生し、その伝ばが変形を支配する。したがって、その弾・塑性波の伝ば特性を知ることが高ひずみ速度の変形特性を明らかにする上で重要である。そして、その材料の動的弾・塑性挙動はひずみ速度などを変数として、構成関係、すなわち応力・ひずみ関係で示される。

通常、高ひずみ速度下での応力・ひずみ関係を求めるのにスプリット・ホプキンソン棒法がよく用いられている。しかし、この装置の使用範囲はひずみ速度が約 10^3 s^{-1} 程度までの微小ひずみ域

に限られているため、本論文で対象としている高ひずみ速度、高ひずみ域における応力・ひずみ関係を求めることは困難である。

そこで本論文においては、shear band の発生に関連するような断熱過程下における応力・ひずみ曲線、すなわち約 10^3 s^{-1} 程度以上の高ひずみ速度および高ひずみ域における構成関係の解明を目的とし、縦衝撃法を用いて試験片内部を伝ばする弾・塑性波の挙動を基に、動的応力・ひずみ関係の基礎となる衝撃応答の検討を行なった。

第 2 章 弾・塑性変形を受ける計測棒の最大衝撃応力の評価

縦衝撃を受ける有限長棒の衝撃応答を理解するためには、衝撃時に発生する衝撃応力の応答を知ることが重要である。その際の衝撃力を測定するために、1 次元棒と見なされる計測棒内を伝ばする弾性波を、ひずみゲージにより検出する方法が最も多く用いられている。しかし、本論文で対象としている衝撃体が高ひずみ速度でなおかつ高ひずみ域まで変形したとき、発生する衝撃応力が大きくなり、計測棒の降伏応力と同等になる可能性がある。

そこで、はじめに計測棒衝撃端にわずかでも塑性変形が生じたときの衝撃応力の伝ば挙動を、1 次元弾・塑性波の伝ば理論を用いて数値解から検討し、既存の計測法の限界と不正確さを明らかにした。つぎに、上で求めた数値結果から衝撃端で発生する最大衝撃応力を評価するパラメーターとして、単位断面積当たりの力積を提案した。さらに、そのパラメーターの有効性を、銅棒を用いて検証し、実験的にも妥当であることを示した。

第 3 章 縦衝撃法による高分子有限長棒の動的降伏応力の評価

shear band が発生しやすい材料は一般にひずみ硬化が小さいことが知られている。そこで、本章においては同様な性質をもち比較的取り扱いが容易な高分子材料を利用して、縦衝撃法により、動的降伏応力を求めるための方法を検討した。同様な評価法は、以前 Hutchings により提案されている。しかし、彼が用いた仮定と、本論文において予め行なわれた実験結果に不一致点があったため、まずその問題点を指摘し、実験結果に基づきひずみ速度を考慮した修正法を提案した。そして、ポリ塩化ビニル、ポリカーボネートを用いてその妥当性を検討し、Hutchings 法と比較して提案した修正法が実験結果とよく一致することを示した。さらに、ホプキンソン棒法では困難な 10^3 s^{-1} 以上のひずみ速度下で、さらにひずみの大きい領域での動的降伏応力を容易に得られることを明らかにした。

第 4 章 形状回復挙動を利用した高分子材料の動的圧縮時の材料温度の推定

試験片の一方の端に、縦衝撃を受ける棒の温度上昇の過程を計測することは、現在のところ極めて困難であるため、これまで、材質の如何にかかわらずほとんど行われていない。

一方、室温で塑性変形を与えられた非晶性高分子材料は、ガラス転移温度以上まで加熱されると、変形前の形状へ回復する形状記憶効果を示す。しかし、変形温度をガラス転移温度よりも約 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 高くすれば形状記憶効果を表わさないことも知られている。また、温度の上昇が、高分子材料

の機械的特性に直接影響することを考えあわせれば、この形状の回復特性は、高速変形を受けた非晶性高分子材料の内部発熱による温度上昇の推定に有効であると考えられる。一方、形状記憶の回復試験は乾燥炉を用いて連続昇温雰囲気中で行なわれる。したがって、試験片は外部から加熱され、その熱は熱伝導により内部へ伝わる。そこで、初めに形状回復へ及ぼす試験片寸法の影響を検討し、その効果を表わす回復モデルを提案し、ポリ塩化ビニルを用いた実験結果と比較した。その結果、試験片寸法とその周囲の温度分布は形状記憶の回復曲線に大きな影響をもつことを示した。

さらに、低ひずみ速度から高ひずみ速度まで、3種の異なったひずみ速度（約 10^{-6} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 10^2 s^{-1} ）で変形を受けた試験片の回復挙動から、その回復過程へ及ぼすひずみ速度の効果を検討した。ひずみ速度の増加とともに記憶の回復開始温度は増加し、最終回復量も低下する。その最終回復量はひずみ速度が $10^0 \text{ s}^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ 付近から、急激に低下することも明らかにした。これらの現象は、変形時の内部発熱によるものと考えられる。その結果、ひずみ速度の変化は回復曲線の平行移動に対応することを示した。また、高ひずみ速度で得られた応力・ひずみ曲線のひずみエネルギーから求められた試験片の温度上昇と熱電対を用いて実測された試験片の温度上昇を比較して、形状記憶効果から推定された試験片の最高温度の妥当性を明らかにした。

さらに、第3章で得られた一端に縦衝撃を受けたポリ塩化ビニル試験片は、衝撃試験後ガラス転移温度以上まで加熱してもほとんど回復しない。この試験片は、 10^3 s^{-1} 以上のひずみ速度を受けていることを考えれば、上述の結果から記憶が回復しないことも当然であり、したがって第2章で得られる高ひずみ速度で変形中の試験片温度はガラス転移温度を越えていると推定できる。

第5章 温度上昇を考慮した半無限長棒内の塑性波の伝ば

第3章における基礎式においては、温度上昇および塑性波の減衰は考慮されていない。また第4章においては、試験片の温度上昇へ及ぼす塑性仕事の影響を形状記憶効果を用いて検討した。そこで、本章では縦衝撃により生じた塑性仕事が熱に変わり、それによる温度上昇が静的な応力・ひずみ関係に影響を与えるとする仮定のもとに、温度上昇を考慮した特性曲線法に基づく数値解析法を示した。用いた構成式はひずみ速度が同一ひずみに対する動的応力と静的応力の差、すなわち過応力に依存するいわゆる、Malvern型に基づき、熱的效果を取り入れたひずみ速度に依存する式である。この手法を用いてアルミニウムの半無限長棒についての解を求めた。

その結果、大ひずみ域では発生しないといわれていた、衝撃端近傍のひずみ一様領域、すなわち、ひずみプラトーが形成されることを明らかにした。また、温度上昇を考慮することにより、衝撃端にひずみ一様領域よりも1割程度大きい、ひずみが急変する局所的な大ひずみ域が発生することも見出した。ひずみプラトーの発生までの時間は静的応力・ひずみ曲線のこう配、すなわちひずみ硬化係数により大きく支配されることを示した。また、ひずみ分布と類似な形状の温度分布、すなわち衝撃端での高温とそれに続く温度プラトーとも言うべき温度一様領域が発生することを明らかにした。さらに、ひずみ速度の依存性の大きさを決める材料定数は、温度分布はもとよりひずみ分布へも大きな影響を与えることが分かった。

第6章 温度こう配をもつ有限長棒内の弾・塑性波の伝ば

第5章において、内部発熱による温度上昇を考慮した弾・塑性波の伝ばの解析法を示し、半無限長棒について弾・塑性波の伝ばに及ぼす温度上昇の影響をひずみ分布と温度分布を考慮して明らかにした。

しかし、実験との対応を考えれば、第3章で示した有限長棒の解析が必要となる。棒が有限長になれば、第3章でも述べたように除荷波の効果が表われる。また、棒内に生じる温度分布は、塑性仕事が増大する負荷過程で発生し、そして成長する。しかし、除荷過程では塑性仕事が増大しないため、その温度分布は変化せず負荷過程での形状が維持される。そこで、有限長棒における温度分布の発生、成長、維持の全領域に対する解析を行なうまえに、除荷過程に対する、定常状態の温度分布をもつ棒内を伝ばする弾・塑性波について考察する必要がある。

そこで第6章では、指数関数で表わされる温度こう配をもつ棒内を伝ばする弾・塑性波の挙動を、特性曲線法を用いて解析した。また、数値解析の例はアルミニウムを対象に行った。その結果、温度こう配は応力、ひずみともに影響を与えるが、特に、温度こう配による棒内各点の変形抵抗差により引き起こされる応力の減少と自由端から生じる除荷波による応力の減少とに大別できる。したがって、変形中自由端からの除荷波の到達以前は前者の効果が支配し、到達後は後者が支配的になり全体の変形様式が決定される。

第7章 温度上昇を考慮した有限長棒内の弾・塑性波の伝ば

第7章では、第5章で示した解法をもちいて自由端からの除荷波の影響が表われる有限長棒の解析を行ない、温度上昇を考慮した場合と考慮しない場合との比較を行った。その結果、内部発熱による温度上昇は、波頭が棒内を1往復する時間でほとんど終了することを明らかにした。また、温度の上昇とともに除荷波の干渉1回当たりの除荷量が減少するため、衝撃応力の持続時間へも温度の上昇は大きく影響する。さらに、前章でも述べた、衝撃応力へのひずみ速度の依存性の大きさを決める材料定数は、応力、ひずみ、持続時間およびその温度上昇へ極めて大きな影響をもち、今後この定数の検討が重要であると思われる。

第8章 結 論

以上、本研究の結果は、実用的には高ひずみ速度下で変形を受けた製品に見られる shear band の形成機構などにも関連する内部発熱を伴う衝撃応答を理解する上で役立つものであるとともに、基礎学術の発展上、高ひずみ速度変形する機械材料の律速過程を検討する方法に関して新たな知見を提供することになる。

審 査 結 果 の 要 旨

近年、高速度加工技術の進展に伴い、材料の高速塑性変形下での動的構成式の正確な評価が不可欠となって来た。初期理論で衝撃端に塑性ひずみ一定の領域を生じることが指摘されたが、実験結果によれば衝撃端に局部的に大ひずみを生じることが示され、ひずみ硬化を考慮した研究などが行われて来た。しかし、工業材料の衝撃挙動は複雑でありまだ完全な解明はなされていない。

本論文は、衝撃力及び発熱の評価に新たな手法を試み、発熱の影響を考慮した動的構成式に基づいて塑性域の発生挙動と分布状態を明らかにしたもので全編8章より成る。

第1章は緒言である。

第2章では、衝撃力の作用時に応力計測棒に塑性変形を生じた場合にも、単位断面積当りの力積をとれば最大衝撃応力の評価に有用なパラメータとなることを提案し、銅棒を用いてその有効性を検証している。

第3章では、従来の動的降伏応力評価法にひずみ速度を考慮した修正を加えることにより、高分子材料の実験結果と合致する結果を得ている。また、本研究では飛翔試験片による計測棒の縦衝撃を行っており、従来のホプキンソン棒法よりもさらに高速度の衝撃実験が可能になることを示している。これらは重要な成果である。

第4章では、衝撃試験片の発熱による温度上昇を、高分子材料の形状回復挙動を利用して測定し、良好な結果を得ている。また、ひずみ速度の増加は回復曲線を回復率の減少する方向へ平行移動させることに相当することを示している。

第5章では、縦衝撃による温度上昇を考慮した動的構成方程式を提案し、アルミニウム棒の半無限長棒に適用して、数値解法により衝撃端附近の塑性ひずみ一定領域にひずみ硬化係数が大きく影響することを明らかにしている。また、温度上昇を考慮することにより衝撃端に局部的大ひずみ域が生じることが示している。

第6章では、有限長棒の衝撃端附近の温度こう配及び自由端からの除荷波の影響を、アルミニウム棒を例にとって詳細に考察している。

第7章では、有限長棒の縦衝撃による発熱を考慮した場合としない場合の比較検討を行い、棒長さ及び材質パラメータの影響を明らかにしている。これは実用上有用な知見である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、実用的見地から棒の縦衝撃により伝ばする弾・塑性波の挙動に対する発熱、棒長さならびに材質の影響を明らかにし、衝撃端附近の塑性ひずみ分布を解明して新知見を加えたもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。